

1-3 南極オゾンホール

2006年のオゾンホールは、面積、欠損量（破壊量）ともに、過去最大級に発達した。最大時の面積は2000年に次いで第2位、欠損量は2003年に次いで第2位だった。昭和基地で観測している日別オゾン全量は10月17日に過去最小値である114m atm-cmを記録した。

2006年のオゾンホールが過去最大級に発達した理由として、①成層圏のオゾン層破壊物質の量が依然として多い状況であること、②2006年の8月から9月にかけて南半球中・高緯度成層圏の気温が低く、オゾンが破壊されやすい気象条件が広範囲に広がっていたこと、などが考えられる。

南極オゾンホールの規模は、1980年代から1990年代半ばにかけて拡大し、その後も大きい状態が続いている。

1980年代初め、春季の南極昭和基地上空のオゾン全量が、それまでと比較すると著しく少なくなっていることが気象庁等の観測により発見された。これはのちにオゾンホールと呼ばれるようになった現象を観測したものである。

オゾンホールは南極上空のオゾン量が極端に少なくなる現象で、オゾン層に穴の開いたような状態であることから名づけられた。南半球の冬季から春季にあたる8月から9月ごろに発生発達し、11月から12月ごろに消滅するという季節変化をしている。

気象庁ではオゾンホールの規模の目安として南緯45度以南でのオゾンホールの面積、最低オゾン全量、オゾン欠損量（破壊量）の3要素を以下のように定義して用いている。

オゾンホール面積	: オゾン全量が220m atm-cm以下の領域の面積
最低オゾン全量	: オゾンホール内のオゾン全量の最低値
オゾン欠損量	: 南緯45度以南のオゾン全量を300m atm-cm（オゾン全量の全球平均値）に回復させるために必要なオゾンの質量

これらの量は、主にNASAの衛星観測によるオゾン全量データをもとに算出しており、2005、2006年はオーラ衛星に搭載されているOMIによるオゾン全量のデータ、それ以前はアースプローブ衛星などに搭載されているTOMSによるデータを使った。衛星の交代や搭載測器の変更により、衛星観測によるオゾン全量データは、地上観測でのオゾン全量データと差がみられる時期があり（付録1-2「オゾンの衛星観測データ」参照）、精度に問題があると考えられる時期があるが、南半球高緯度域に関しては差が小さいため、ここでは補正等を行わずそのまま用いている。一方、地上からのオゾン全量観測データとして、南極昭和基地におけるドブソン計による観測結果を、オゾンの鉛直分布として、昭和基地におけるオゾンゾンデ観測データを使用した。

以下に2006年の南極域上空のオゾン層の状況とオゾンホールの経年変化について述べる。

1-3-1 2006年南極オゾンホールの状況

衛星による観測

オーラ衛星のOMIの日別値から求めた2006年オゾンホールの規模の推移を図1-3-1に示す。2006年のオゾンホールは、9月24日に2006年の最大の面積である2,929万km²を記録した。これは2000年9月9日の3,027万km²に次ぐ、過去第2位の広さだった。また、オゾン欠損量も9月24日に10,535万トンとなり、2003年9月25日の10,726万トンに次ぐ、過去第2位の規模だった。2006年オゾンホールは過去最大級であったといえる。その後、11月にかけて、同時期における最大規模で推移したが、12月にはいってからオゾンホールは急速に縮小し、12月17日に消滅した。また、オゾンホール内の最低オゾン全量は、8月から9月中旬にかけて高い状態で推移したが、その後低下し、10月8日に2006年の最低値である85m atm-cmを記録した。その後は、11月下旬までこれまでの最低レベルで推移した。

オーラ衛星のOMIにより観測した2006年10月の南半球月平均オゾン全量分布を口絵3に、2006年8月から12月までの南半球旬平均オゾン全量分布図を資料3「南半球旬平均オゾン全量分布図(2006年8月～12月)」に示す。

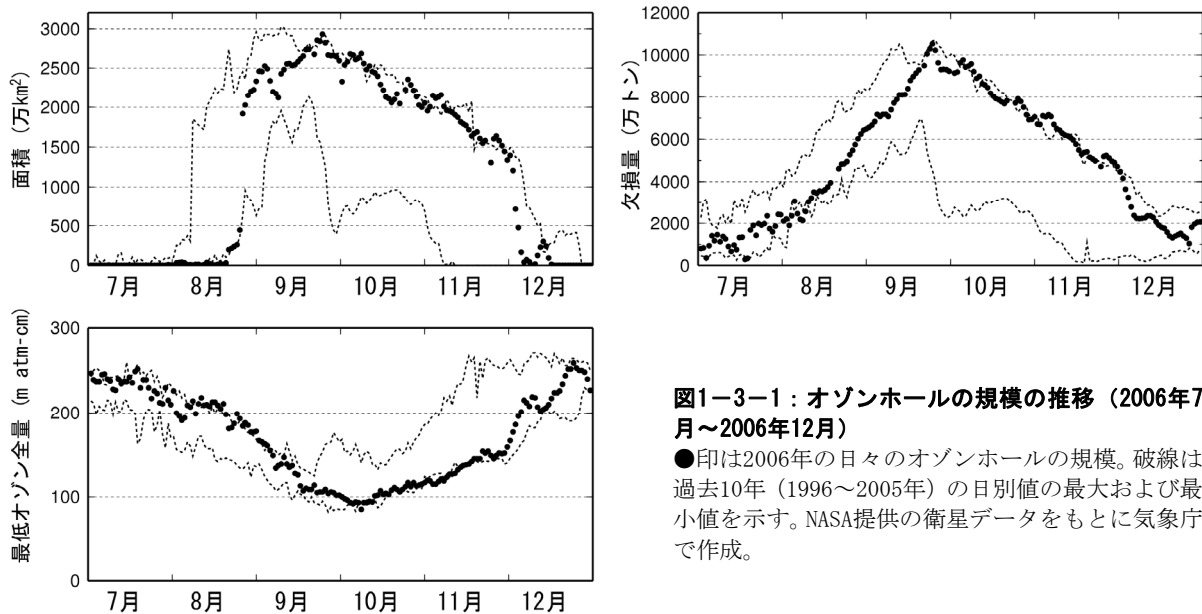


図1-3-1：オゾンホール規模の推移（2006年7月～2006年12月）

●印は2006年の日々のオゾンホールの規模。破線は過去10年（1996～2005年）の日別値の最大および最小値を示す。NASA提供の衛星データをもとに気象庁で作成。

南極昭和基地における地上観測

2006年の昭和基地上空の月平均オゾン全量は、5月と7月を除き、参照値（オゾンホールが明瞭に現れる以前の1961～1980年の平均値）より少なく、特に8～11月は顕著だった（1-2節の図1-2-1）。

昭和基地で観測したオゾン全量の日代表値の変化を図1-3-2に示す。8月下旬から11月にかけて、オゾンホールの目安である220m atm-cmを下回る非常に少ないオゾン全量が観測され、同時期における過去最少レベルで推移した。10月17日には2006年の最小値である114m atm-cmを記録し、これは日別オゾン全量の過去最小値となった。10月、11月の月平均オゾン全量もそれぞれ137m atm-cm、192m atm-cmと、その月としての過去最小値を記録した。これは、オゾンホールの中心位置が10月以降、昭和基地側に偏っていたことが影響している（資料3「2006年8月から12月における旬平均南半球オゾン全量分布図」参照）。

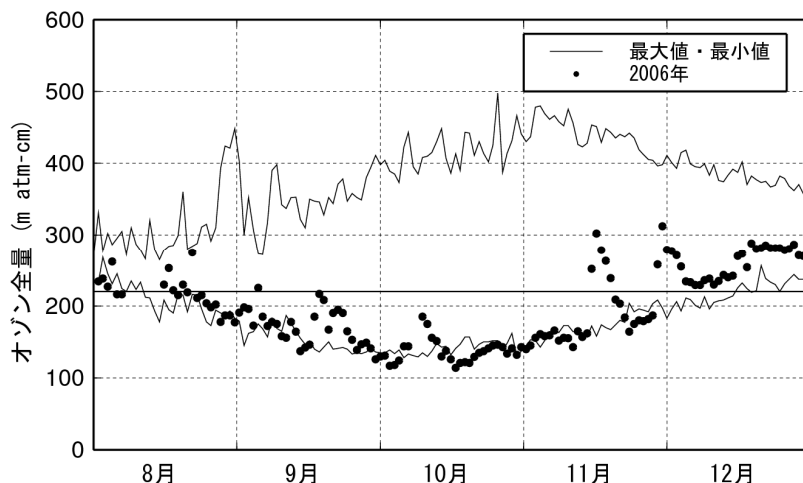


図1-3-2：南極昭和基地における日別オゾン全量の推移（2006年8月～2006年12月）

●は2006年の観測値（日代表値）。実線は観測開始（1961年）以来の最大および最小値。横太線はオゾンホールの目安である220m atm-cmの値。昭和基地におけるオゾン全量観測結果から作成。

南極昭和基地におけるオゾンゾンデ観測

2006年の昭和基地上空におけるオゾン分圧の鉛直分布の推移を図1-3-3上に示す。昭和基地上空のオゾン分圧は、平均的には高度14~20km (100~50hPa) 付近で最大となる。2006年のこの高度のオゾン分圧は、1月から7月までは、ほぼ10mPa以上であったが、8月中旬以降低下し、9月中旬から11月までの期間では、3mPa以下というきわめて低いオゾン分圧が観測された。高度20km (50hPa) 付近では、11月下旬から12月にかけての時期に回復しているが、高度14km (100hPa) 付近では、5mPa以下の状態が続いた。オゾン分圧の規格化偏差(参照値からの偏差を標準偏差で割った値)の鉛直分布推移(図1-3-3下)をみると、9月から11月の高度20~22km (30hPa) 付近で、オゾン分圧が標準偏差の2倍以上少ない時期があることがわかる。16~20 km (50hPa) 付近では12月になっても標準偏差の2倍以上少ない状態が続いていた。このように2006年のオゾンホールは、高度20~22km (30hPa) 付近という比較的高い高度でオゾン破壊が顕著という特徴がみられた。

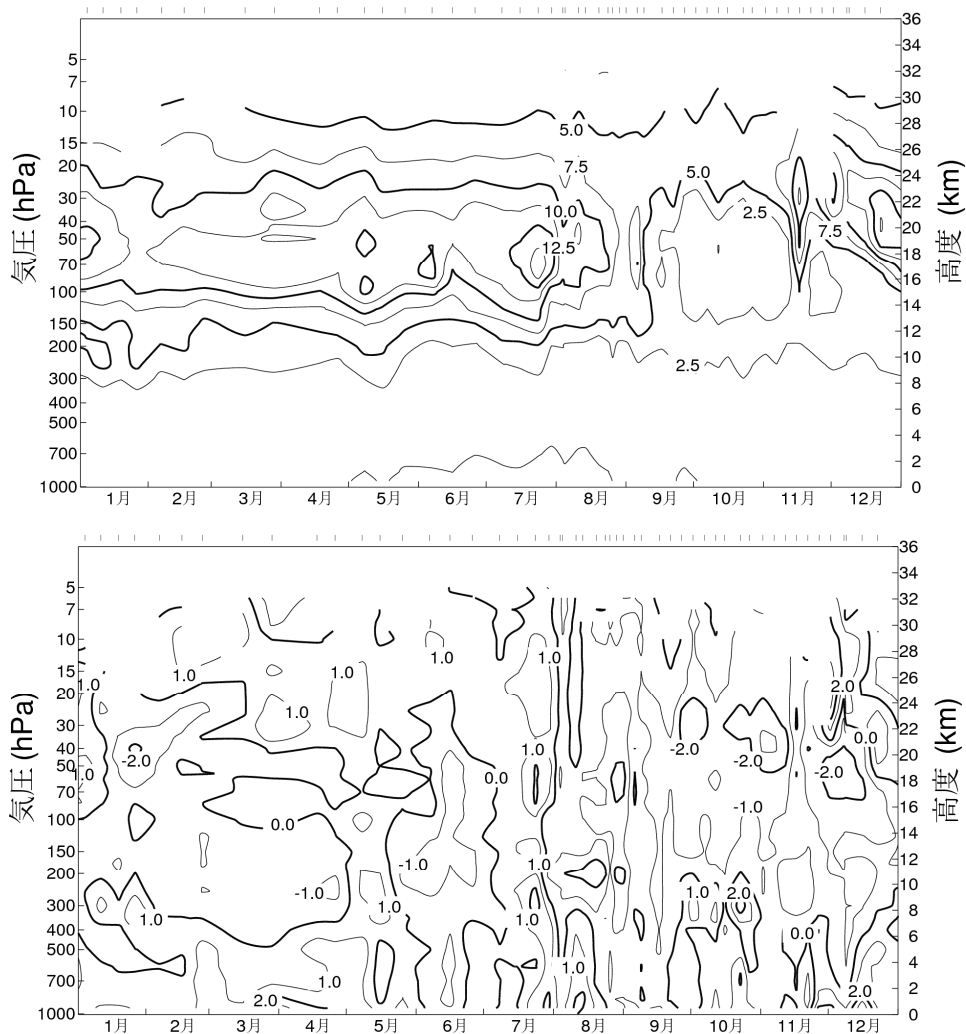


図1-3-3：南極昭和基地におけるオゾン分圧(上)とその規格化偏差(下)の鉛直分布の推移(2006年1月~2006年12月)

等値線間隔は2.5mPa(上)と1.0(下)。規格化偏差は参照値からの偏差を標準偏差で割った値。参照値は1971~2000年の平均値。標準偏差の統計期間も同期間で作成。昭和基地のオゾンゾンデ観測結果より作成。

2006年オゾンホールに関連する下部成層圏の気象状況

オゾンホールの形成に大きな役割を果たす極域成層圏雲が生成されるための気象条件として、成層圏の低温が持続することが挙げられる（解説3「南極でオゾンホールが発生するメカニズム」参照）。極域成層圏雲出現の目安が -78°C であることから、気象庁では30hPa面の -78°C 以下の面積を監視している。図1-3-4に2006年の南緯60度以南における30hPa面の最低気温、および -78°C 以下の面積の推移を示す。

2006年の南極域の最低気温は、8月まではほぼ平年並の範囲にあったが、9月、10月は平年より低く推移した。 -78°C 以下の面積の推移をみると、7月以降10月中旬までこの時期の標準偏差を上回る大きさで推移した。これは、同時期に南半球成層圏の高緯度から中緯度で気温が平年より低かったことと対応している。2006年は極域成層圏雲が出現できる気象条件を満たす領域が広く、その状態が長く持続したといえる。

成層圏気温の変化は対流圏の気象場の状況に強く影響される。南半球冬季には対流圏プラネタリー波が成層圏へ上方伝播し、極域成層圏気温の上昇をともなう。この波の上方伝播の強さの指標となるEPフラックス (Eliassen-Palm flux) の上向き成分(100hPa)と、冬季の終わりから春季の初めにおける極域成層圏気温(30hPa気温)との間には強い相関関係がみられることが知られている (Newman et al., 2001)。2006年の100hPaにおける45日平均EPフラックス上向き成分の推移 (図1-3-5) をみると、10月中旬まで対流圏からのプラネタリー波の上方伝播は平年よりも標準偏差程度少ない状態が持続している。その後はほぼ平年並の状態に推移した。この変化は30hPa面の -78°C 以下の面積の推移とほぼ対応している。このことから2006年の下部成層圏で低温域が広がった原因は、対流圏からのプラネタリー波の伝播が平年より少なく、成層圏の極渦が安定して存在できたことにあると考えられる。

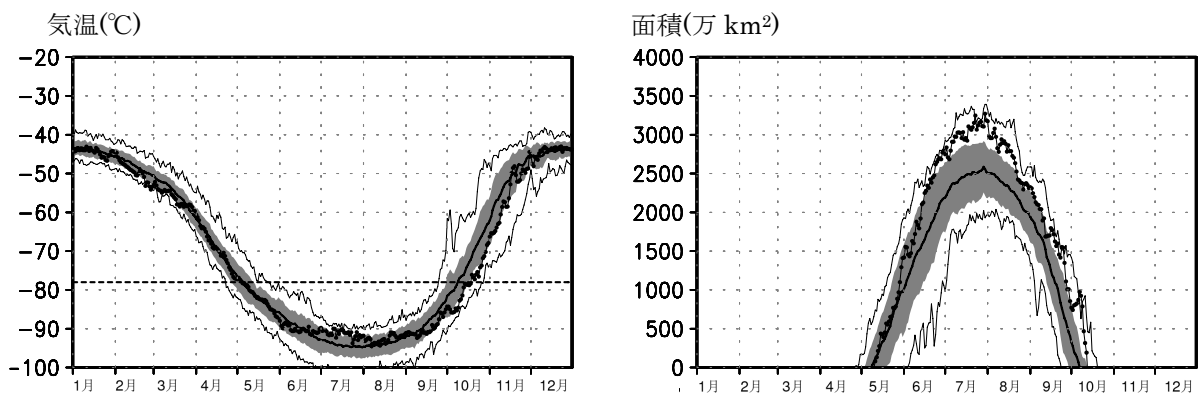


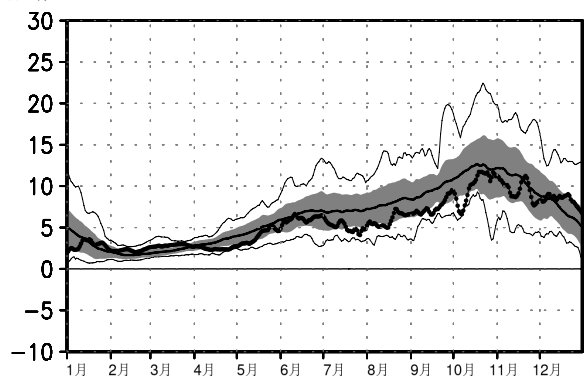
図1-3-4：南極域上空の下部成層圏の最低気温（左）および気温が -78°C 以下の領域の面積（右）の推移（2006年1月～2006年12月）

南緯60度以南の30hPa（高度約23km）面における日別の最低気温の推移(左図)と極域成層圏雲の出現する目安となる -78°C 以下の領域の面積の推移(右図)。●印は2006年の値を示す。陰影中の細実線は1979～2005年の累年平均値。陰影の外の細実線は同期間の最高値および最低値。陰影は標準偏差の範囲。左図中の横の破線は極域成層圏雲出現の目安である -78°C 。気象庁の気候データ同化システム (JCDS*) による解析値をもとに作成 (累年平均値や標準偏差、最高値、最低値は、1979～1998 年の間はERA-40* を、1999～2004 年はJRA-25* を使用して算出。)

図1-3-5：対流圏から成層圏へのプラネタリー波の伝播の強さの推移（2006年1月～2006年12月）

100hPaにおける前45日平均渦熱輸送 (EPフラックス上向き成分に比例) の推移 (南緯45～75度の波数1～3成分の平均)。これが大きい場合は成層圏の極渦が不安定となる。太線は2006年の値を示す。陰影中の細実線は1979～2005年の累年平均値。陰影の外の細実線は同期間の最高値および最低値。陰影は標準偏差の範囲。気象庁の気候データ同化システム (JCDS) による解析値をもとに作成 (累年平均値や標準偏差、最高値、最低値は、JRA-25 およびJCDS を使用して算出。)

渦熱輸送 (K m/s)



*は「用語解説」を参照

1-3-2 南極オゾンホール

衛星観測データからみたオゾンホールの経年変化

オゾンホールの面積、最低オゾン全量およびオゾン欠損量（破壊量）の極値の経年変化を図1-3-6に示す。これを見ると、南極オゾンホールの規模は1980年代から1990年代にかけて拡大し、その後も大きい状態が続いていることがわかる。

2006年のオゾンホールの面積は、2000年に次ぐ過去第2位の広さに広がった。またオゾン欠損量も2003年に次ぐ過去第2位の規模となった。2006年のオゾンホールは過去最大級であった。

衛星観測による1979年から2006年までのオゾン全量分布図は資料5「10月の南半球月平均オゾン全量分布図」に示した。

図1-3-7に、オゾンホールの目安である220m atm-cm以下の領域が消滅した日の経年変化を示す。消滅日は1990年頃まで年々遅くなる傾向があった。1990年代は12月に消滅することが多く、2006年の消滅日は12月17日であった。

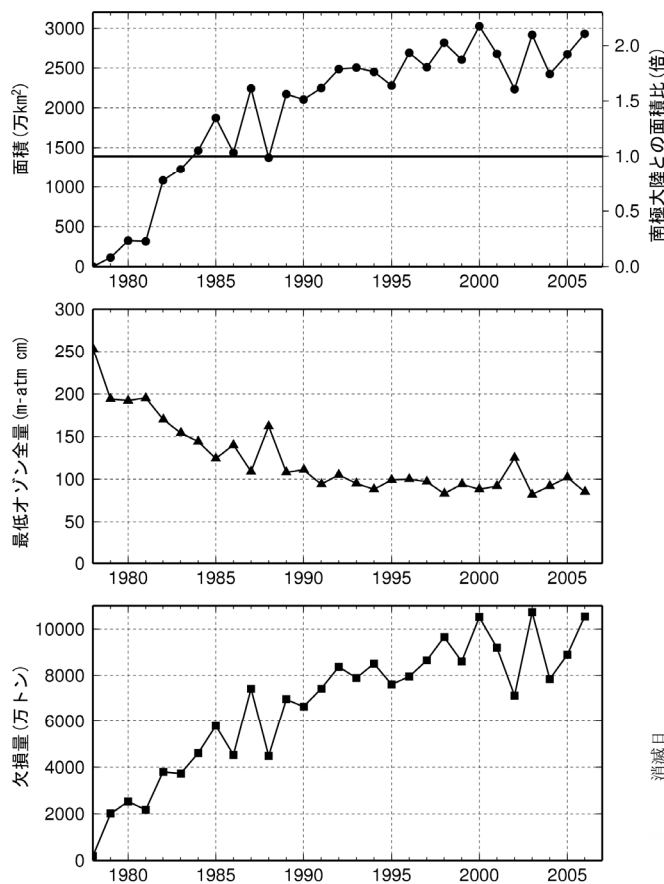


図1-3-6：オゾンホールの規模の経年変化

1979～2006年のオゾンホールの面積、最低オゾン全量、オゾン欠損量の年極値の変化。NASA提供の衛星データをもとに作成（主にTOMSデータを使用。1995年はTOVSの高分解能赤外放射計のデータ、2005年2006年はOMIデータを使用）。

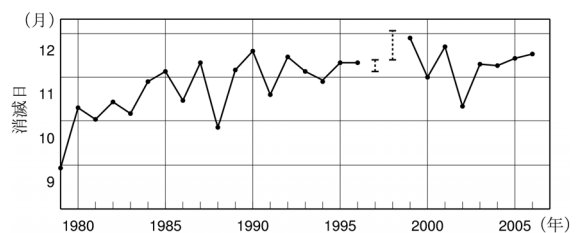


図1-3-7：南極域で220m atm-cm以下の領域がみられなくなった日の経年変化

1979～2006年の220m atm-cm以下の領域が消滅した時期の推移。NASA提供のTOMSデータをもとに作成。ただし、1995年はSBUV/2、2005年以降はOMIのデータをもとに作成した。なお、1997年および1998年は、衛星データの一部（1997年12月5日～13日、1998年12月13日～1999年1月2日）が得られていないため、消滅日を特定できていないが、破線で示した期間中に消滅したと推定される。

オゾンホール の 経年変化 と 気象場変動 と の 関係

各年におけるオゾンホール の 最大拡大時 の 規模 の 経年変化 は、第1に成層圏におけるオゾン層破壊物質の濃度の指標であるEESC* (等価実効成層圏塩素) の変化に対応し、次に成層圏極渦縁辺部付近の気温の年々変動に対応している (Newman et al., 2004)。この成層圏気温の変動は対流圏の気象場の状況に影響を受ける。これは対流圏からのプラネタリー波の上方伝播が、極域成層圏気温の上昇をともなうためである。

オゾンホール の 面積 の 極値 の 経年変化 と EESC フィッティング曲線を図1-3-8に、オゾンホール の 面積 の 極値 から EESC フィッティング成分を取り除いた残差成分と9月の成層圏極渦縁辺部付近の気温の年々変化の経年変化を図1-3-9に示す。オゾンホール の 残差成分は、極渦縁辺部付近の気温と負の相関がある (相関係数-0.5、絶対値で0.4以上が信頼度95%で統計的に有意、統計期間は1979~2006年)。

オゾンホール の 残差成分に対する9月の月平均帯状平均気温の相関と、9月の30hPa気温の相関を図1-3-10に示す。これをみると50hPa以上の高度における南緯50~60度付近の気温は、オゾンホール面積の残差成分と負の相関が高い。この時期の南緯60度付近の気温は極渦の大きさに関係があり、オゾンホール面積が、極渦の面積に対応して変動していることを示している。また、30hPaにおける気温とオゾンホール の 残差成分の相関分布をみると、南極昭和基地上空付近の気温と負の相関が高い。これは極渦が昭和基地上空を覆うように広がっている場合にオゾンホール の 規模 が大きいことを示している。

図1-3-9の△印は100hPaにおけるプラネタリー波の上方伝播の強さを示す渦熱輸送 (EPフラックス上向き成分に比例、7~8月平均、南緯45~65度平均) の経年変化である。オゾンホール の 残差成分とプラネタリー波の上方伝播の強さには負の相関がある (相関係数-0.44)。このように対流圏や成層圏の気象場の変動がオゾンホール の 規模 の 変動 に及ぼす影響は大きい。

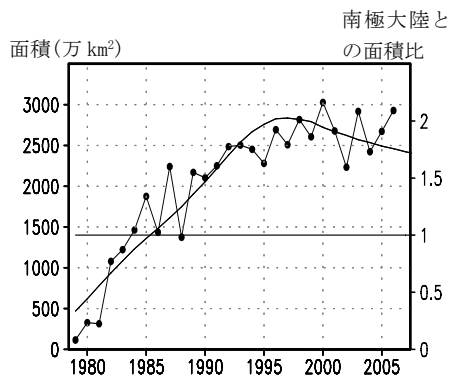


図1-3-8 : 南極オゾンホール面積の極値の経年変化 (●印) と EESC フィッティング曲線

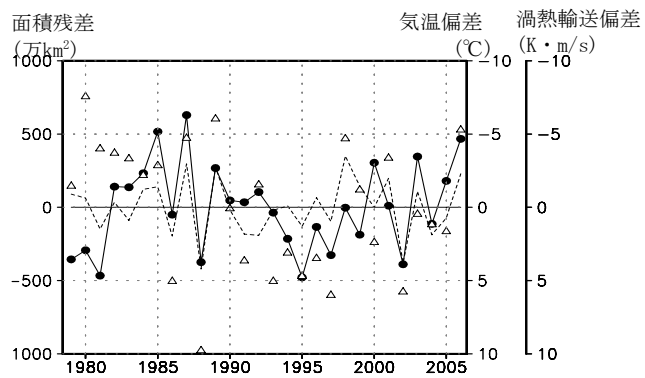


図1-3-9 : オゾンホール面積残差成分と9月の成層圏極渦縁辺部付近の気温年々変化、100hPaにおける渦熱輸送の経年変化 ●印は南極オゾンホール面積の極値からEESCフィッティング成分を取り除いた残差成分、点線は南緯45~65度平均30hPa気温の年々変化、△印は7~8月平均南緯45~65度平均渦熱輸送 (EPフラックス上向き成分に比例)。

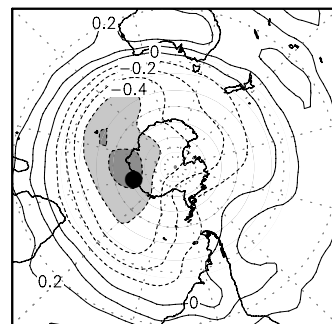
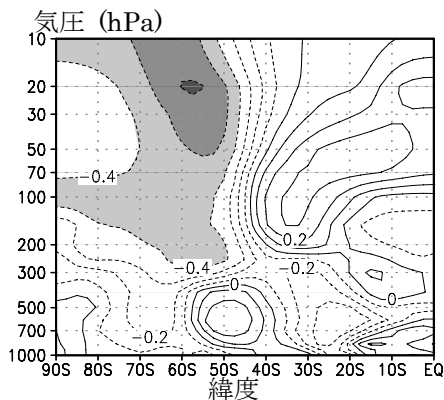


図1-3-10 : 南極オゾンホール の 残差成分経年変化に対する9月の月平均帯状平均気温 (南半球、高度緯度断面) との相関 (左) および9月の30hPa気温 (南半球) の相関 (右)

統計期間は1979~2006年。相関係数が-0.4より小さい (負の相関が高い) ところに陰影。●印は昭和基地。

*は「用語解説」を参照

南極昭和基地上空のオゾンの経年変化

南極昭和基地における春～秋季にかけての月平均オゾン全量の経年変化を図1-3-11に示す。オゾンホール時期にあたる9月から12月のオゾン量が、1980年頃から長期的に減少しているのがわかる。この地点でのオゾン量の変化が、必ずしもオゾンホールの規模の変化をそのまま反映しているわけではないが、昭和基地上空はオゾンホールの縁辺となることが多く、オゾンホールの規模の目安となっている。9月から11月の時系列において、2002年にオゾン全量が急増しているが、これは、2002年の南極域で9月に成層圏突然昇温が発生し、成層圏の気温が過去50年で最高となるような特異な気象条件となり、オゾン破壊が大規模には進まなかったことによる。2006年はオゾンホールの規模が大きかったことに対応して10月、11月の月平均オゾン全量はその月としての過去最少を記録した。

図1-3-12に、昭和基地のオゾンゾンデ観測による10月の高度12kmから20kmまでの月平均オゾン量の経年変化を示す。この高度のオゾン量は、オゾンホールの発達にもなって大きく減少するため、オゾンホールの長期的な変化傾向の良い指標になる。この高度のオゾン量は、1990年代初め以降、ほぼ毎年少ない状態が続いており、1990年代後半以降は、1970年代と比較して20%以下という少ない状態が続いている。10月の極小値が1992年に現れているが、これはピナトゥボ火山噴火（1991年6月）に起因するエアロゾル粒子がこの時期に成層圏に多く混入し、エアロゾル粒子表面での不均一反応（解説3「南極でオゾンホールが発生するメカニズム」参照）のためにオゾン破壊が促進されたためと考えられる。一方、2002年は上で述べたように南極域の成層圏が突然昇温のため高温であったことからオゾン層破壊が大規模ではなかった。2006年10月のこの高度におけるオゾン量は少なく、1992年に次ぐ過去第2位だった。

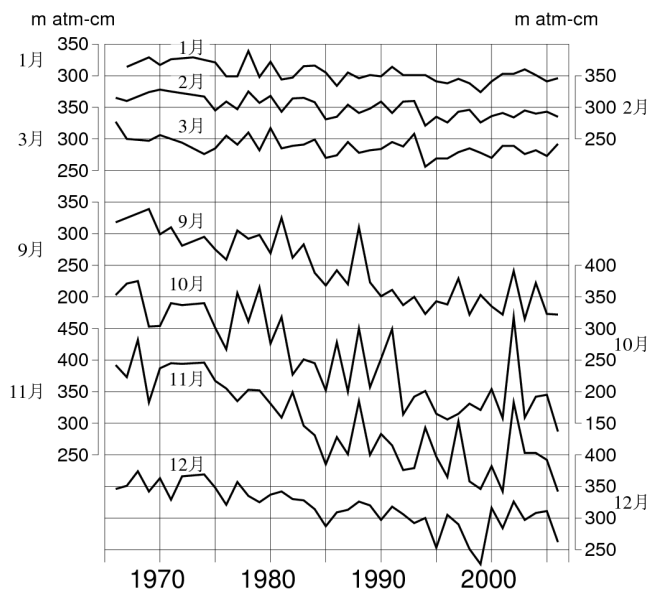


図1-3-11: 南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化

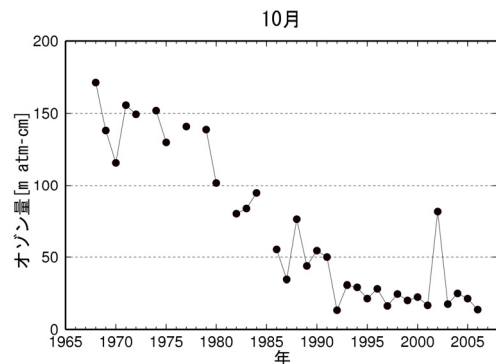


図1-3-12: 南極昭和基地上空の高度12～20kmの10月の月平均オゾン量の経年変化

南極昭和基地上空のオゾンのトレンド

1980年以降のオゾンゾンデ観測による高度別オゾン分圧のトレンドを図1-3-13に示す。このトレンドは、オゾン層破壊物質の影響による変化成分をみるために1979-2006年のデータに対してEESCフィッティングを行い1980年代の変化量で示したものである(付録2参照)。通年では高度15km(約100hPa)付近でのオゾン減少が大きく、春季(9~11月)は特に顕著である。

図1-3-14に、昭和基地における1979年以降のオゾン分圧と気温の高度分布の月別トレンドを示す。どちらもEESCフィッティングしたトレンドである。オゾン分圧の減少のピークは10月の70hPa付近に現れており、6mPa/10年を超える減少を示している。11月以降、オゾン分圧の減少の大きな領域はしだいに下層へと移っている。一方、気温は10~11月に100~70hPa付近で6°C/10年以上の低下を示している。オゾンと同様に、気温が低下した領域は11月以降下層へ移っている。このように極夜明けの時期(9月ごろ)以降における気温の低下はそれに先立つオゾン減少と対応しており、これはオゾンの減少にともなって紫外線の吸収による成層圏大気の加熱が減ったことが主な原因と考えられる。なお、Solomon et al. (2005)によればアムンセン・スコット基地(南極点)におけるオゾンゾンデ観測でも同様な変化がみられ、南極域で広範囲に現れている現象である。

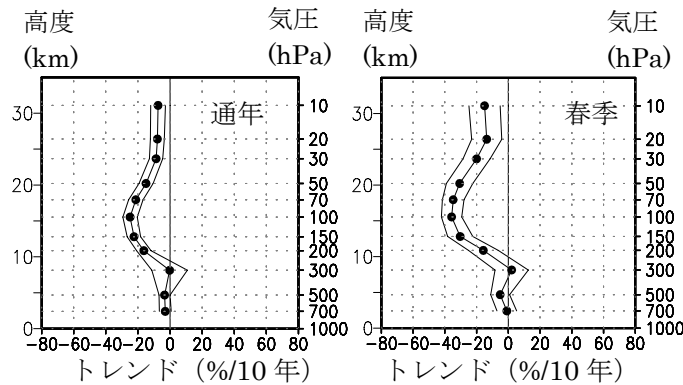


図1-3-13: 南極昭和基地におけるオゾン分圧のトレンド(%/10年)の高度分布
●印はオゾンゾンデ観測から求めたオゾン分圧のトレンド(%/10年)。1979~2006年の月別値に対してEESCフィッティングを行い1980年代における変化量で示した。横軸はトレンド、縦軸は高度。外側の折線は95%信頼区間の範囲。左が通年、右が春季(9~11月)。

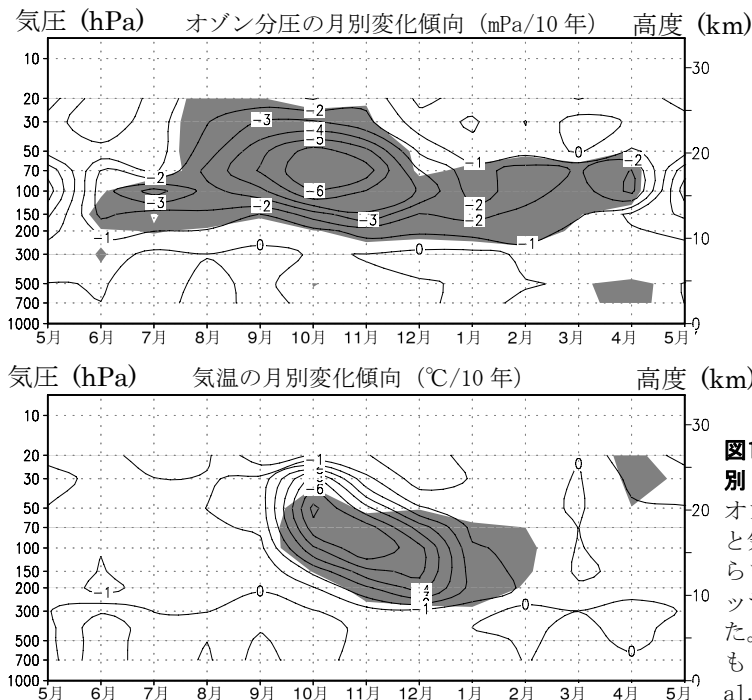


図1-3-14: オゾンおよび気温の高度分布の月別トレンド
オゾン分圧の月別トレンド(mPa/10年、上)と気温の月別トレンド(°C/10年、下)。どちらも1979~2006年のデータに対してEESCフィッティングを行い1980年代の変化量で示した。陰影部は95%信頼区間の範囲の値を加えてもトレンドが負を示す領域。(Uchino et al., 1999; を修正。2006年までデータ更新)

解説3 南極でオゾンホールが発生するメカニズム

地上で放出されたクロロフルオロカーボン類 (CFCs) 等は、上部成層圏 (高度40km付近) において太陽紫外線により分解され塩素原子となる。この塩素原子が触媒となって上部成層圏でオゾンを連鎖的に破壊する。塩素原子は、その後下部成層圏にも輸送されるが、そこでは塩化水素、硝酸塩素といった準安定な物質に変化し、通常は直接オゾンを破壊することはない。

ところが、極域では冬季から春季にかけての特有の気象条件によって、下部成層圏でもオゾン破壊が起こる。そのメカニズムは以下のとおりである。極域では冬季、成層圏に形成される極渦 (極夜渦ともいう) により、極域上空とその周囲との空気の交換が著しく制限され、極域上空の成層圏大気は周囲から孤立する。冬季は太陽光があたらないため、極渦の内部は放射冷却により著しく低温になる。成層圏の気温が低下すると、極域成層圏雲 (PSCs : Polar Stratospheric Clouds) と呼ばれる微細な粒子からなる雲が成層圏に形成される。極域成層圏雲は、硝酸や水蒸気などが低温で凝縮した液相や固相の粒子から形成され、大きく分けて下部成層圏の気温がおよそ -78°C (195K) 以下で発生するタイプIのものと、およそ -85°C (188K) 以下で発生するタイプIIのものがある。前者には硝酸が多く含まれるのに対し、後者は氷晶 (H_2O) が主成分であると考えられている (WMO, 1999)。極域成層圏雲の粒子の表面で起こる不均一反応 (気体分子が固体または液体の表面で起こす反応など、異なる相の間で起こる化学反応。異相反応ともいう) により、成層圏の塩素の大部分を占める硝酸塩素 (ClONO_2) や塩化水素 (HCl) といった、それ自体はオゾン破壊作用のない化合物から塩素分子 (Cl_2) などが発生する (WMO, 1995)。春季になって極域上空の成層圏に太陽光が戻ってくると、冬に蓄積された塩素分子などから光によって解離した活性塩素原子が触媒的にオゾン破壊を開始する。オゾンホールは、南極域で、このメカニズムによって急激なオゾン破壊が進むことによって形成されるものである。このように、オゾンホールの形成は極渦の状況と密接に関係している。このため、極渦の年々変動ともなってオゾンホールの規模にも年々の変動が生ずる。

解説4 オゾンホールの規模の統計的な推定方法

オゾンホールに関する報道発表等で用いている、統計的なオゾンホールの規模の予測は以下の方法で行っている。

オゾンホールの規模を表すパラメータとして、オゾン欠損量を取り上げ、その年の最大値を支配する因子を調査した結果、オゾン欠損量は、オゾン層破壊物質濃度と、6月および8月の成層圏の温度場 (実際には30hPa面における -78°C 以下の面積) の三つの要因でかなりの部分を説明できることが示された (気象庁, 1993、伊藤他, 1993)。オゾン欠損量 (M) を目的変数として下記の重回帰式

$$M_i = a \cdot X_i + b \cdot Y_i + c \cdot Z_i$$

を設定する。添え字 i は年の番号を表す。 X と Y は温度場の説明変数で、それぞれ6月と8月における30hPa面の月平均温度が -78°C 以下の低温域の面積である。 Z はオゾン層破壊物質の濃度を表現する説明変数で、大気中のクロロフルオロカーボン等による塩素濃度をモデル化した数列を与えた。それぞれの年の M , X , Y , Z の値は、データ期間の平均値からの偏差の百分率で与えている。 a , b , c はそれぞれの説明変数の目的変数に対する寄与の度合いを表現する係数である。影響の大きさは、オゾン層破壊物質の濃度、8月の低温域の面積、6月の低温域の面積の順である。この重回帰式による重相関係数は約0.98であり、自由度調整済みの決定係数^{*}は約0.94であることから、この重回帰式はオゾン欠損量の予測に有用である。

※選択した説明変数により、目的変数の変動がどの程度説明されたかを示す決定係数 (重相関係数の2乗) は、予測に役立たない説明変数を増やしても見かけ上、係数が大きくなる性質がある。説明変数を増やしただけでは決定係数が大きくなるように調整したものが、自由度調整済み決定係数である。